

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №2 (164). С.3-10.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №2 (164). P.3-10.

Научная статья
УДК 629.371.21:620.22
doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-3-10

Металловедческие исследования по выбору аналога зарубежной стали для элемента подвески гоночного автомобиля

Владислав Вячеславович Фомин¹, аспирант
Александр Юрьевич Малахов², к.т.н.
Лариса Георгиевна Петрова³, д.т.н.

^{1, 2, 3} Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹ v.fomin63@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

² malahov-alex@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³ petrova_madi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7248-2454>

Аннотация. Актуальность проведенного исследования обусловлена необходимостью решения проблемы импортозамещения материалов в автомобилестроении. В статье приведены результаты металлловедческих исследований по выбору аналога зарубежной стали для изготовления детали подвески гоночного автомобиля класса «Формула Восток». Комплекс исследований включал химический и металлографический анализ, прочностные испытания на растяжение и измерение твердости. Для определения допустимых нагрузок, возникающих в элементах направляющего аппарата подвески, применен метод анализа напряжено-деформированного состояния нагруженного узла с построением 3D-модели. В качестве заменителя итальянской омологированной стали для изготовления элемента направляющего аппарата подвески определена наиболее близкая по химическому составу отечественная сталь 20X. Различия в свойствах оригинальной стали и стали-замениителя связаны с особенностями их микроструктуры: более высокий уровень упрочнения оригинальной стали обусловлен меньшим размером зерна. Проведение термической обработки в виде закалки и высокого отпуска (улучшение) позволяет получить в стали 20X прочность и твердость наиболее близкие к оригиналу, при более высокой пластичности.

Ключевые слова: конструкционная сталь, микроструктура, механические свойства, термическая обработка, гоночный автомобиль, Формула Восток, направляющий аппарат подвески

Благодарности: материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту № FFSM-2024-0001.

Для цитирования: Фомин В.В., Малахов А.Ю., Петрова Л.Г. Металловедческие исследования по выбору аналога зарубежной стали для элемента подвески гоночного автомобиля // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 2 (164). С. 3–10. doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-3-10

Metal science research aimed at choosing a foreign steel analogue for a racing car suspension member

Vladislav V. Fomin¹, PhD student
Alexander Yu. Malakhov², PhD Eng.
Larisa G. Petrova³, D. Eng.

^{1, 2, 3} Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI), Moscow, Russia

¹ v.fomin63@yandex.ru

² malahov-alex@ya.ru

³ petrova_madi@mail.ru

Abstract. *The relevance of the study is due to the need to solve the problem of import substitution of materials in the automotive industry. The article presents the results of metal research aimed at choosing a foreign steel analogue for the manufacture of suspension parts of a Formula Vostok racing car. The complex of studies included chemical and metallographic analysis, tensile strength tests and hardness measurements. To determine the permissible loads occurring in the suspension guide device members, the method of analyzing the stress-strain state of the loaded assembly with the construction of a 3D model is applied. As a substitute for Italian homologated steel for the manufacture of the suspension guide element, the 20X domestic steel was determined to be the closest in chemical composition. The differences in the properties of the original steel and the substitute steel are related to the peculiarities of their microstructure: high strengthening level of the original steel results from the smaller grain size. Heat treatment in the form of quenching and high tempering (improvement) makes it possible to obtain in 20X steel the strength and hardness closest to the original, with higher ductility.*

Keywords: structural steel, microstructure, mechanical properties, heat treatment, racing car, Formula Vostok, steering unit

Acknowledgements: the material was prepared within a scientific research on the project No. FFSM-2024-0001.

For citation: Fomin V.V., Malakhov A.Yu., Petrova L.G. Metal science research aimed at choosing a foreign steel analogue for a racing car suspension member / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 2 (164). P. 3–10. doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-3-10

Введение

В настоящее время из-за ограничения поставок в нашу страну зарубежных деталей одной из ключевых становится задача импортозамещения материалов, и, в первую очередь, сталей. Решение проблемы изыскания заменителей зарубежных сталей является актуальным не только для Российской Федерации. В странах Азии, нацеленных на самостоятельное производство, активно занимаются разработкой правил применения национальных марок сталей, эквивалентных европейским стальным материалам. Например, в инструкции [1], составленной профессиональными сообществами Гонконга, Китая и Макао, приводятся стали, производимые США, Японией, Австралией/Новой Зеландией, Китаем и Россией, которые рекомендованы для использования в качестве аналогов европейским сталям. Установлены принципы эквивалентности стальных материалов, к которым относятся как соответствие характеристик материала, так и гарантии качества. Характеристиками сравнения являются прочность, пластичность, вязкость, а также химический состав и технологический показатель свариваемости.

Задача выбора эквивалентных отечественных аналогов для замены зарубежных сталей особенно насущна для автомобильной отрасли, и в частности, при конструировании гоночных автомобилей. Многие детали для них изготавливаются из так называемых омологированных сталей, удовлетворяющих

специальным техническим требованиям для данного класса автомобилей [2]. Это относится, в частности, к элементам системы подвески различной конструкции [3 – 7]. Отдельные трудности возникают при отсутствии доступа к спецификации на конкретный материал, что требует разработки и применения методик реверсивного инжиниринга.

В данной работе рассмотрен пример применения металловедческого комплекса исследований [8] для замещения стали для изготовления элемента направляющего аппарата подвески гоночного автомобиля класса «Формула Восток».

Гоночный автомобиль класса «Формула Восток» для национальных кольцевых гонок создан на базе автомобиля «Формула 3» в классе Европейского чемпионата. При конструировании направляющего аппарата подвески гоночного автомобиля применяется прокат итальянской стали в форме труб овального (каплевидного) сечения. Использование стали от единственного поставщика вызывает очевидные трудности, что требует поиска отечественного аналога.

Целью настоящей работы является обоснование выбора конструкционной стали и ее термообработки для изготовления направляющего аппарата подвески гоночного автомобиля класса «Формула Восток» путем сравнительного исследования химического состава, микроструктуры и прочностных свойств оригинальной стали и потенциального заменителя.

Методика исследования и применяемое оборудование

Для определения допустимых нагрузок, возникающих в элементах направляющего аппарата подвески гоночного автомобиля класса «Формула Восток», применен метод анализа напряжено-деформированного состояния нагруженного узла с построением 3D-модели при помощи системы автоматизированного проектирования SolidWorks [9].

Подбор отечественного аналога для замены оригинальной стали основан на анализе признаков сравнения: структуры, химического состава и прочностных характеристик (по ГОСТ 4543-2016 [10]). Для анализа применен комплекс металлургических исследований, разработанный для мониторинга структурного состояния конструкционных материалов, который успешно используется при анализе разрушений стальных деталей автомобилей [8, 11]. Данный комплекс включает:

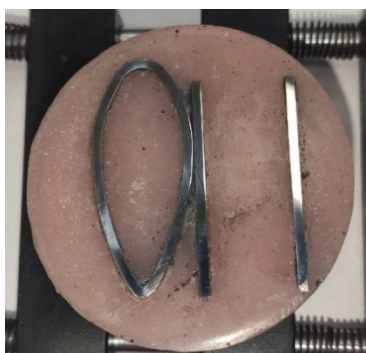
- исследование химического состава стали с применением искрового оптико-эмиссионного спектрометра ИСКРОЛАЙН-300К (Россия);
- металлографические исследования микроструктуры подготовленных микрошлифов в оптическом металлографическом микроскопе МЕТАМ ЛВ-41 (ЛОМО, Россия);
- определение прочностных характеристик сталей при испытаниях на растяжение по ГОСТ 1497-84 [12] на разрывной машине УТС 110М-50 0-У (ТЕСТСИСТЕМЫ, Россия).
- измерение твердости образцов на твердомере МЕТОЛАБ-101 (ООО «Метолаб», Россия).

Для экспериментальных исследований использовались образцы, вырезанные из оригинальной итальянской стальной трубы (рис. 1) и образцы отечественных сталей, составы которых приведены в табл. 1.

1. Химические составы потенциальных отечественных сталей – аналогов по ГОСТ 4543-2016

1. Chemical compositions of potential domestic analog steels according to GOST 4543-2016

| Содержание элементов, % | | | | | | | |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|--------|---------------|
| Сталь | C | Si | Mn | Cr | Ni | Mo | B |
| 20X | 0,17...0,23 | 0,17...0,37 | 0,50...0,80 | 0,70...1,00 | < 0,3 | < 0,11 | - |
| 20ХГР | 0,18...0,24 | 0,17...0,37 | 0,70...1,00 | 0,75...1,05 | < 0,3 | < 0,11 | 0,008...0,005 |
| 18ХГ | 0,15...0,21 | 0,17...0,37 | 0,90...1,20 | 0,90...1,20 | < 0,3 | < 0,11 | - |



a)



б)

Рис. 1. Образцы оригинальной стали:

a – для металлографических исследований; *б* – для испытаний на растяжение

Fig. 1. Samples of the original steel:

a – for metallographic studies; *b* – for tensile tests

Результаты проведённых исследований

Анализ напряженно-деформированного состояния деталей направляющего аппарата

гоночного автомобиля «Формула Восток» производится по двум видам нагружения: с толкающей тягой и с тянущей тягой (рис. 2).

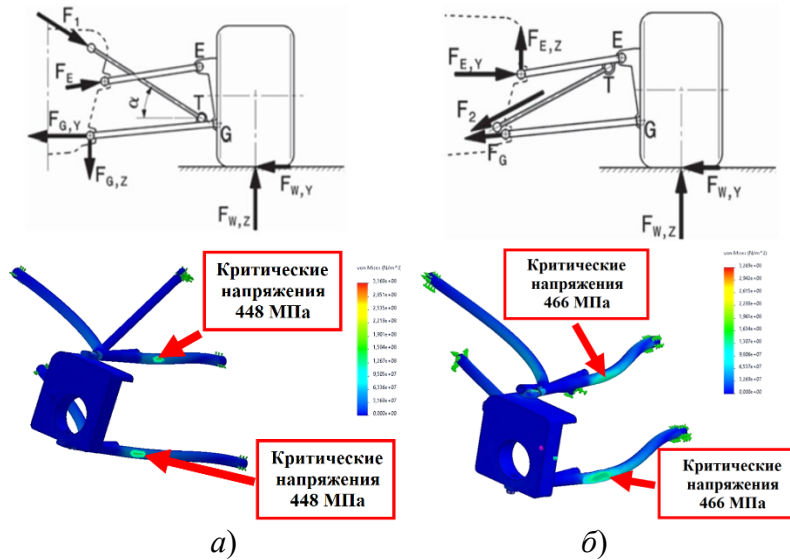


Рис. 2. Модели напряженно-деформированного состояния деталей направляющего аппарата подвески гоночного автомобиля «Формула Восток»: а – подвеска с толкающей тягой; б – подвеска с тянущей тягой

Fig. 2. Models of the stress-strain state of the parts of the steering unit of the Formula Vostok racing car: а – suspension with a striking rod; б – traction-driven suspension

Результаты моделирования показали, что наибольшие критические напряжения в рычагах направляющего аппарата гоночного автомобиля (466 МПа) возникают при нагружении подвески тянущей тягой. Для гоночных автомобилей коэффициент запаса прочности элементов конструкции подвески выбирается равный 1,2. Это делается с целью обеспечения минимального веса неподрессоренных масс гоночного автомобиля. Таким образом, предельно допустимое напряжение для стали

деталей подвески в данном случае составляет $\sigma = 560$ МПа.

Результаты химического анализа образца оригинальной трубы представлены в табл. 2: она изготовлена из низкоуглеродистой стали, легированной хромом, с микродобавками молибдена. Сравнение показывает, что по основным элементам зарубежной стали в наибольшей степени соответствует отечественная конструкционная сталь 20Х (табл. 2).

2. Химический состав оригинальной стали элемента подвески

2. Chemical composition of the original steel of the suspension member

| Содержание элементов, % | | | | | | | |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Fe | C | Si | Mn | Cr | Ni | Mo | Al |
| основа | 0,226 | 0,205 | 0,685 | 1,076 | 0,103 | 0,203 | 0,037 |

При сопоставлении механических свойств оригинальной стали и потенциального заменителя установлено, что как по твердости, так и по прочностным характеристикам трубный прокат из российской стали 20Х в состоянии поставки существенно уступает исходной стали (табл. 3). Вместе с тем, сталь 20Х

обладает более высоким относительным удлинением. При этом диаграммы растяжения сравниваемых сталей различаются (рис. 3). Для стали 20Х получена кривая с площадкой текучести, тогда как оригинальная сталь имеет диаграмму, характерную для малопластичных материалов.

3. Механические и структурные характеристики сравниваемых сталей

3. Mechanical and structural characteristics of the compared steels

| Сталь | Твердость | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | Размер зерна d_{cp} , мкм/балл по ГОСТ 5639-82 |
|----------|---------------------|------------------|----------------------|--------------|--|
| Оригинал | 105 HRB (280 HB) | 834 | 625 | 4 | 4 / №13 |
| 20Х* | 95 HRB (212 HB) | 580 | 375 | 15 | 6 / №12 |

Примечание. * – в состоянии поставки

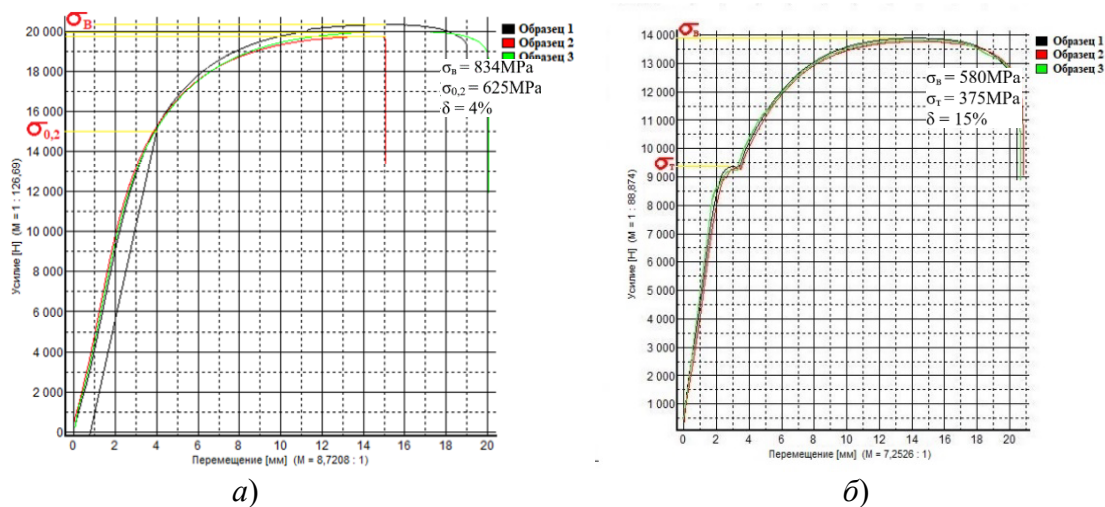


Рис. 3. Диаграммы растяжения образцов:
a – оригинал; *б* – сталь 20Х в состоянии поставки

Fig. 3. Stretching diagrams of the samples:
a – original; *b* – steel 20X in the state of supply

Различия в свойствах сравниваемых сталей обусловлены их микроструктурой. Металлографические исследования микрошлифов показали, что обе стали имеют ферритно-перлитную структуру (рис. 4, 5). Но оригинальная

сталь имеет структуру более мелкозернистую (табл. 3), а перлитная составляющая раздроблена на мелкие фрагменты, в отличие от стали 20Х в поставке, где перлит находится в пластинчатом виде.

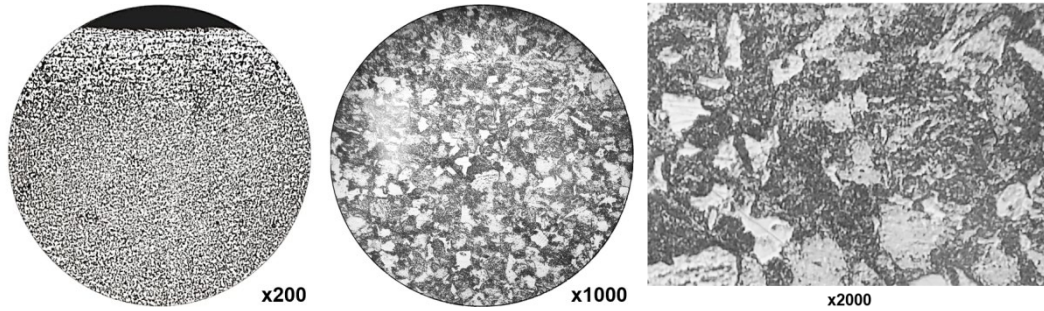


Рис. 4. Микроструктура стали – оригинала при различных увеличениях

Fig. 4. Microstructure of original steel at various magnifications

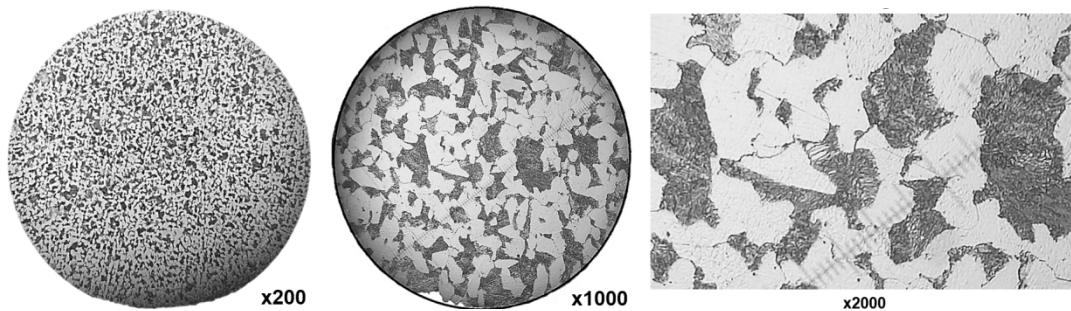


Рис. 5. Микроструктуры стали – аналога 20X в состоянии поставки

Fig. 5. Microstructures of 20X analog steel in the state of supply

В поверхностном участке оригинальной стали наблюдается некоторая полосчатость, оставшаяся после горячей прокатки. Также на поверхности различима небольшая зона обезуглероживания толщиной 0,15...0,17 мм (рис. 4, $\times 200$).

Можно предположить, что наблюдающаяся в оригинальной стали структура получена в результате применения комбинированного метода деформационной термоциклической обработки [13], который позволил создать значительное упрочнение.

С целью увеличения прочностных свойств стали 20X, предлагаемой в качестве заменителя, образцы были подвергнуты термической обработке в виде улучшения: заалке в масло с температуры 880 °С с последующим высоким отпуском при температуре 600 °С. Металлографическое исследование микрошлифа после проведённой термической обработки, показало, что микроструктура стали представляет собой зернистый сорбит (рис. 6).



Рис. 6. Микроструктура стали 20X после закалки и высокого отпуска

Fig. 6. Microstructure of 20X steel after quenching and high tempering

Твёрдость образцов стали 20Х после улучшения существенно повышается и достигает значения твёрдости оригинальной стали – 105 HRV (280 HB). Испытания на растяжение показали (рис. 7), что предел прочности ($\sigma_B = 824$ МПа) увеличился практически до уровня характеристики оригинальной стали ($\sigma_B = 834$ МПа), а предел текучести ($\sigma_T = 760$ МПа) даже превышает значение для исходной стали ($\sigma_{0,2} = 625$ МПа), как и относительное удлинение ($\delta = 8\%$).

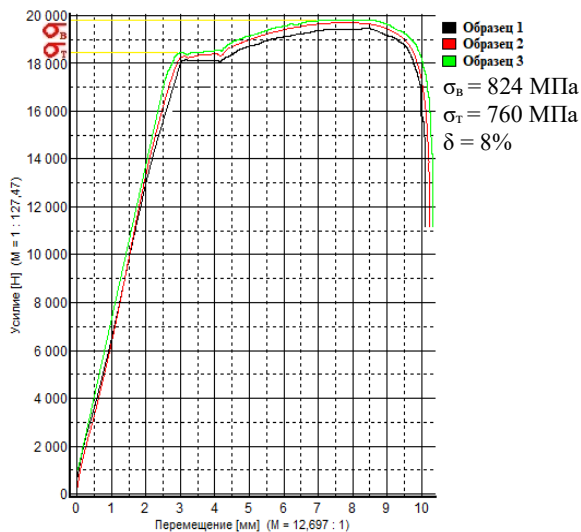


Рис. 7. Диаграмма растяжения образцов из стали 20Х после улучшения (закалка и высокий отпуск)

Fig. 7. Stretching diagram of 20X steel samples after improvement (quenching and high tempering)

Заключение

На основе комплекса металловедческих исследований определены химический состав, особенности микроструктуры и характеристики базовых механических свойств оригинальной итальянской стали, используемой для изготовления деталей направляющего аппарата подвески гоночного автомобиля класса «Формула Восток». Сравнительные исследования позволили предложить в качестве заменителя исходной стали наиболее подходящую по составу и механическим свойствам российскую сталь марки 20Х. Оптимальная структура стали и наиболее близкие к оригиналу прочностные свойства достигаются после термической обработки в виде улучшения: закалки в масло с температуры 880 °С и последующего высокого отпуска при температуре 600 °С.

Преимуществами предлагаемой в качестве заменителя стали являются повышенная пластичность и предел текучести, а также ее доступность и невысокая стоимость.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Chung K.F., Ho H.C., Feng W. Selection of equivalent steel materials to European steel materials specifications: Professional guide PG-003. Hong Kong: Polytechnic University, 2021. 276 p.
2. Kumar Y., Siddiqui R.A., Upadhyay Y., Prajapati S. Kinematic and Structural Analysis of Independent type suspension system with Anti-Roll bar for Formula Student Vehicle // Materials Today: Proceedings. 2022. № 56. Part 5. P. 2672–2679.
3. Biswal S., Prasanth A., Udayakumar R., Deva S., Gupta A. Design of a suspension system and determining suspension parameters of a medium downforce small Formula type car, MATEC // Web of Conferences 124, 07006 ICTTE. 2017. № 12. P. 1–6.
4. Patil A., Patil S., Shah M., Sall N. Design and analysis of suspension system with different material for SUPRA SAE INDIA // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2018. V. 9. № 3. P. 32–36.
5. Samant S.Y., Santosh K., Kaushal K. J., Sudhanshu K. B., Dhiraj G., Sivapuram R., Karuna K. Design analysis of formula student race car suspension system : 12th International Conference on Vibration Problems, ICOVP 2015 // ScienceDirect. 2018. № 1931. P. 1138–1149.
6. Kashem S.B., Mustapha K.B., Kannan S., Roy S., Safe A.A., Chowdhury M.A., Choudhury T.A., Ektesabi M., Nagarajah R. A study and review on vehicle suspension system and introduction of a high-bandwidth configured quarter car suspension system // Aust. J. Basic & Appl. Sci. 2015. № 9 (30). P. 59–66.
7. Wang H. Enhancing vehicle suspension system control performance based on the improved extension control // Advances in Mechanical Engineering. 2018. № 10 (7). P. 1–13.
8. Петрова Л.Г., Лихачёва Т.Е., Малахов А.Ю. Исследовательский комплекс для мониторинга структурного состояния конструкционных материалов и его применение при анализе разрушений стальных деталей автомобилей // Вестник МАДИ. 2013. № 2 (33). С. 11–17.
9. Малахов А.Ю., Карелина М.Ю., Петрова Л.Г., Перекрестов А.Е., Перекрестова В.А. Применение метода моделирования напряженно-деформированного состояния при производстве автотехнической экспертизы // Проблемы экспертизы в автомобильно-дорожной отрасли. 2021. № 1 (1). С. 29–40.
10. ГОСТ 4543-2016. Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия : межгосударственный стандарт : дата введения 01.10.2017 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС). М.: ФГУП «Стандартинформ», 2019. 50 с
11. Шестопалова Л.П., Лихачева Т.Е., Петрова Л.Г., Перекрестов А.Е., Малахов А.Ю. Металловедческие исследования причин усталостных

разрушений коленчатых валов ДВС при проведении автотехнической экспертизы/ Проблемы экспертизы в автомобильно-дорожной отрасли. 2022. № 1 (2). С. 37–58.

12. **ГОСТ 1497-2023.** Металлы. Методы испытаний на растяжение: межгосударственный стандарт: дата введения 01.07.2024 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС). М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2024. 49 с.

13. **Прудников А.Н., Прудников В.А.** Структура и свойства листовой стали 10, подвергнутой деформационной термоциклической ковке // Развитие технических наук в современном мире : сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции 11 декабря 2016 г. Сибирский государственный индустриальный университет, 2016. С. 39–42.

REFERENCES

1. Chung K.F., Ho H.C., Feng W. Selection of equivalent steel materials to European steel materials specifications: Professional guide PG-003. Hong Kong: Polytechnic University, 2021. 276 p.

2. Kumar Y., Siddiqui R.A., Upadhyay Y., Prajapati S. Kinematic and Structural Analysis of Independent type suspension system with Anti-Roll bar for Formula Student Vehicle // Materials Today: Proceedings. 2022. № 56. Part 5. P. 26722679.

3. Biswal S., Prasanth A., Udayakumar R., Deva S., Gupta A. Design of a suspension system and determining suspension parameters of a medium downforce small Formula type car, MATEC // Web of Conferences 124, 07006 ICTTE. 2017. № 12. P. 1–6.

4. Patil A., Patil S., Shah M., Sall N. Design and analysis of suspension system with different material for SUPRA SAE INDIA // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2018. V. 9. № 3. P. 32–36.

5. Samant S.Y., Santosh K., Kaushal K. J., Sudhanshu K. B., Dhiraj G., Sivapuram R., Karuna K. Design analysis of formula student race car suspension system : 12th International Conference on Vibration Problems, ICOVP 2015 // ScienceDirect. 2018. № 1931. P. 1138–1149.

6. Kashem S.B., Mustapha K.B., Kannan S., Roy S.,

Safe A.A., Chowdhury M.A., Choudhury T.A., Ektesabi M., Nagarajah R. A study and review on vehicle suspension system and introduction of a high-bandwidth configured quarter car suspension system // Aust. J. Basic & Appl. Sci. 2015. № 9 (30). P. 59–66.

7. Wang H. Enhancing vehicle suspension system control performance based on the improved extension control // Advances in Mechanical Engineering. 2018. № 10 (7). P. 1–13.

8. Petrova L.G., Likhacheva T.E., Malakhov A.Yu. Research complex for monitoring the structural condition of structural materials and its application in the analysis of destruction of steel parts of automobiles // Vestnik MADI, 2013, no. 2 (33), pp. 11–17.

9. Malakhov A.Yu., Karelina M.Yu., Petrova L.G., Perekrestov A.E., Perekrestova V.A. Application of the stress-strain state modeling method in the production of automotive technical expertise. // Problems of expertise in the automotive and road industry, 2021, no. 1 (1), pp. 29–40.

10. **GOST (All-Union State Standard) 4543-2016.** Metal products made of structural alloy steel. Technical specifications: interstate standard: date of introduction 01.10.2017 / Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (MGS). Moscow: FSUE «Standartinform», 2019, 50 p.

11. Shestopalova L.P., Likhacheva T.E., Petrova L.G., Perekrestov A.E., Malakhov A.Yu. Metallographic studies of the causes of fatigue failures of crankshafts engine during the automotive expertise / Problems of expertise in the automotive and road industry, 2022, no. 1 (2), pp. 37–58.

12. **GOST (All-Union State Standard) 1497-2023** Metals. Tensile testing methods: interstate standard: date of introduction 07/01/2024 / Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (MGS). Moscow: Federal State Budgetary Institution «Institute of Standardization», 2024, 49 p.

13. Prudnikov A.N., Prudnikov V.A. Structure and properties of sheet and plate steel 10 subjected to deformation thermocyclic forging // Development of technical sciences in the modern world: proceedings based on the results of the international scientific and practical conference on December 11, 2016. Siberian State Industrial University, 2016, pp. 39–42.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 18.11.2024; одобрена после рецензирования 03.12.2024; принята к публикации 10.12.2024.

The article was submitted 18.11.2024; approved after reviewing 03.12.2024; assepted for publication 10.12.2024.